

Іванюк Н.Д., Біла Т.Я.

Київський національний університет технологій та дизайну

**ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ
АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ В СКЛАДІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ
ОСОБИСТОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ**

Анотація. В статті приведено результати експериментальних досліджень роботи літій-іонної акумуляторної батареї в складі електропривода особистого транспортного засобу. Розроблено експериментальний зразок електричного велосипеда для дослідження параметрів акумуляторної батареї. Показано, що одним з шляхів підвищення ефективності використання літій-іонної акумуляторної батареї є рух транспортного засобу в номінальному режимі. Встановлено, що акумуляторна батарея, яка застосовується в особистому транспортному засобі, під час роботи в номінальному режимі за умовою дотримання температурних режимів значно краще зберігає свій ресурс.

Ключові слова: акумуляторна батарея; електричний велосипед; контролер; напруга; швидкість; струм; температура.

Ivaniuk N., Bila T.

Kyiv National University of Technologies and Design

**DETERMINATION OF RATIONAL OPERATING MODES OF THE BATTERY
AS A PART OF THE ELECTRIC DRIVE OF A PERSONAL VEHICLE**

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the lithium-ion battery in the electric drive of a personal vehicle. An experimental sample of an electric bicycle was developed to study the parameters of the battery. It is shown that one of the ways to increase the efficiency of lithium-ion battery is the movement of the vehicle in nominal mode. It is established that the rechargeable battery, which is used in a personal vehicle in the nominal mode, provided that the temperature regimes are observed, retains its resource much better.

Keywords: rechargeable battery; electric bicycle; controller; voltage; speed; current; temperature.

Вступ. В умовах глобальної зміни клімату та забруднення навколишнього середовища перед людством стоїть нагальна проблема переходу на альтернативні джерела енергії [1, 2]. Одним із перспективних напрямів розвитку електроенергетичного комплексу України є створення транспорту, що працює на електротязі. Тяговими джерелами струму, що приводять в рух транспортний засіб, є акумуляторні батареї (АБ) різного типу [3]. Основними параметрами АБ являються її ємність, потужність, швидкість зарядження, струм та напруга живлення, стійкість до змінювання температури навколишнього середовища, габаритні розміри та маса [4, 5].

Основними факторами, що заважають масовому використанню електромобілів, є низький ресурс тягових акумуляторів, значна автономність в порівнянні з автомобілями на базі двигунів внутрішнього згоряння, обмежене впровадження інфраструктури заряджання при низьких температурах навколишнього середовища. Крім того, вартість акумуляторної батареї, наприклад, в сучасних електричних велосипедах становить близько 40% від його загальної вартості. Найбільшою мірою продуктивність АБ залежить від ефективності поповнення, зберігання та використання електроенергії, що обумовлюється ресурсом АБ, пробігом і експлуатаційними витратами. Експлуатаційні характеристики акумуляторної батареї певного типу встановлюються експериментальним шляхом, а від точності їх визначення залежить правильний вибір двигуна.

Проте на сьогоднішній час існують технічні передумови успішного та швидкого створення ефективних малопотужних двоколісних транспортних засобів на електротязі, а саме велосипедів, скутерів, інвалідних візків, тощо. Тому обґрунтування вибору типу тягової АБ і визначення раціональних режимів роботи під час експлуатації особистого транспортного засобу для підвищення ресурсу та енергоефективності є актуальними.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ефективності використання тягової акумуляторної батареї в складі особистого транспорту шляхом підбору оптимального режиму роботи. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: обґрунтувати вибір типу АБ; розробити функціональну схему та експериментальний зразок; провести експериментальні дослідження для оцінки ефективності експлуатації особистого транспортного засобу на прикладі електричного велосипеда.

Результати досліджень. З метою обґрунтування вибору типу будь якого технічного об'єкту, зокрема АБ, необхідно визначити його кількісні та якісні показники. Аналіз апріорної інформації [6–8] дозволив встановити основні типи акумуляторних батарей та перелік їх кількісних характеристик, на які необхідно орієнтуватись під час вибору найбільш ефективної (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння кількісних показників акумуляторних батарей

Тип АБ	Свинцево-кислотні	Нікель-кадмієві	Нікель-метал-гідридні	Літій-іонні
Показник				
Номинальна напруга, В	2	1,2	1,2	3,7
Питома енергоємність, Вт·год/кг	30...40	40...60	30...80	90...140
Питома потужність, Вт/кг	180	150	250...1000	1800
Середній час заряджання, год	> 10	8	6	2
Кількість циклів розряджання/заряджання (термін придатності)	500...800	2000	800	2000
Середній саморозряд за місяць, %	4	20	30	7
Середня вартість за кВт·год, дол.	150	400...800	250	450

До якісних показників АБ обрано такі характеристики:

- компактність – визначає масо-габаритні властивості для надання заданих кількісних параметрів;
- швидкий процес заряджання/або ні – можливість батареї заряджатися максимальними для неї струмами менш ніж за 2,5 години;
- простота утилізації – ступінь складності технологічного процесу, що пов'язана з утилізацією або неможливістю відновлення корисних хімічних елементів;
- ефект пам'яті – оборотна втрата ємності, що має місце в деяких типах електричних акумуляторів при порушенні рекомендованого режиму заряджання, зокрема, під час заряджання не повністю розрядженого акумулятору;
- допустиме перезаряджання – кількісне показання, що визначає допустиме значення при заряді акумулятора понад 100%;
- глибина розрядження – реальна кількість (від заявленої) енергії, яку акумуляторна батарея може віддати без збільшення температури;
- періодичність обслуговування.

Розподілення якісних показників приведено в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння типів акумуляторних батарей за якісними показниками

Тип АБ	Свинцево-кислотні	Нікель-кадмієві	Нікель-метал-гідридні	Літій-іонні
Показник				
Компактність	-	+	+	+
Швидкість процесу заряджання	-	+	+	+
Простота утилізації	-	-	+	+
Термін зберігання понад 3 роки	+	+	-	+
Ефект пам'яті	-	+	+	-
Допустиме перезарядження	Високий	Середній	Низький	Дуже низький
Глибина розрядження, %	50	50...80	50..85	80
Періодичність обслуговування, місяці	3...6	1...2	2...3	Не регламентується

На основі проведеного аналізу показників акумуляторів чотирьох різних типів (табл. 1 і 2) обрано літій-іонну батарею в якості тягової, що обумовлено такими параметрами:

- високими значеннями питомих показників;
- високими значеннями допустимих зарядних і розрядних струмів;
- можливістю швидкого заряджання;
- відсутністю необхідності обслуговування;
- максимальним терміном придатності;
- низькими показниками саморозрядження;
- відсутністю ефекту пам'яті.

Наступним завданням дослідження є розроблення функціональної схеми електричного велосипеда з літій-іонною акумуляторною батареєю (рис. 1).

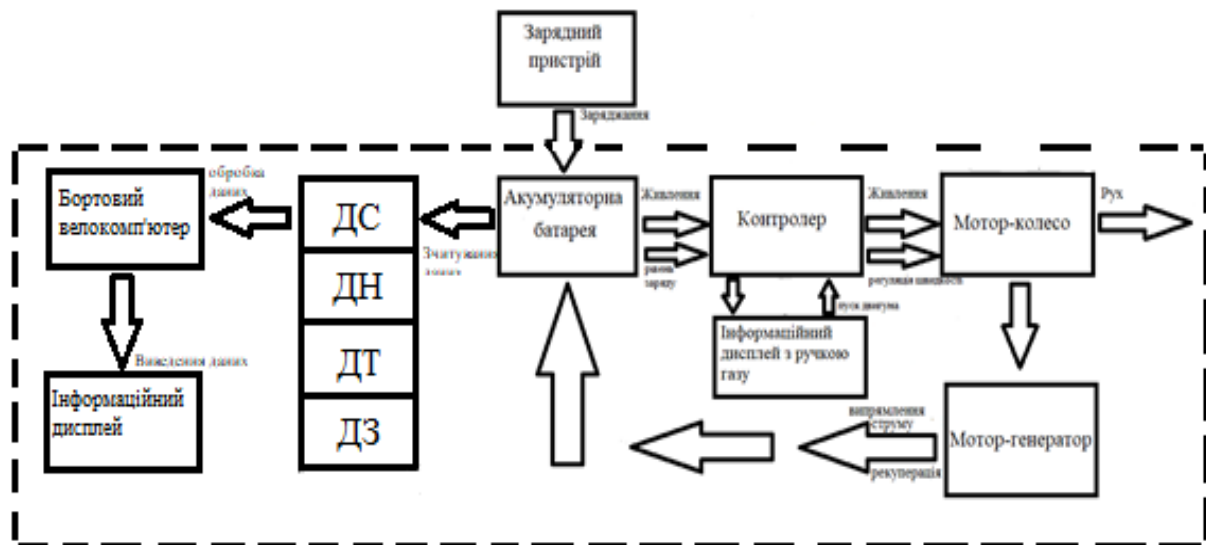


Рис. 1. Функціональна схема електричного велосипеда

Схема складається з прямоприводного мотор-колеса, мотор-генератора, літій-іонної АБ, контролера, вело-комп'ютера з інформаційним дисплеєм, блоку датчиків. Пуск двигуна відбувається кнопкою, потім після натискання ручки газу АБ подає напругу на мотор-колесо через контролер і система приводиться у рух. Взаємодія з бортовим вело-комп'ютером здійснюється через інформаційний дисплей, на якому

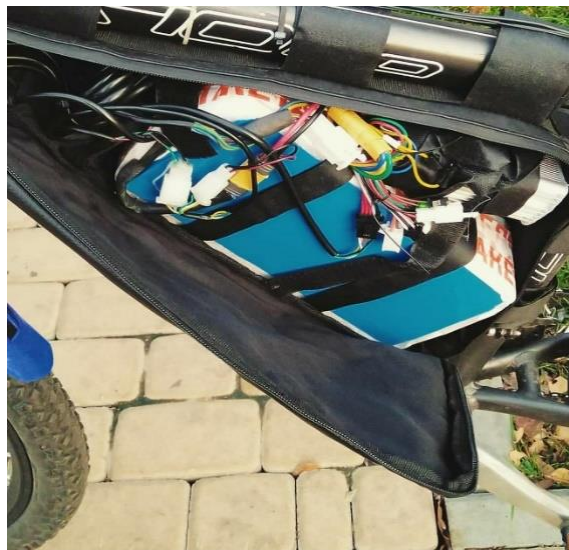
відображаються швидкість транспортного засобу, що відстежується за допомогою технології GPS, залишковий рівень заряду АБ, час тривалості поїздки. Вело-комп'ютер оснащений технологією CAN та отримує дані від вбудованих датчиків з модулів системи (рис. 1). Датчик струму (ДС) – цифровий амперметр зчитує рівень струму та надсилає дані до мікроконтролера бортового вело-комп'ютера. Датчик напруги (ДН) – цифровий вольтметр зчитує рівень споживаної напруги, що використовується для живлення мотор-колеса. Датчик температури (ДТ) – цифровий термометр, вмонтований в корпус АБ, зчитує температуру всередині корпусу АБ. Датчик заряджання (ДЗ) – цифровий вольтметр, зчитує залишковий рівень напруги АБ для забезпечення безпечної роботи системи тягового транспортного засобу. Мотор-колесо генерує трифазний змінний струм, який випрямляється за допомогою діодного мосту, перетворюється в постійний та йде на підзарядку АБ. Таким чином в системі відбувається рекуперація (рекуперативне гальмування). Стаціонарне заряджання АБ відбувається за допомогою зарядного пристрою з АС/DC конвертором.

Відповідно до функціональної схеми (рис. 1) створено експериментальний зразок електричного велосипеда (рис. 2, а). Прототипом обрано велосипед для крос-кантрі, який переобладнано в електричний велосипед шляхом заміни переднього колеса на мотор-колесо вентильного типу. Встановлено волого-захисну сумку в трикутну раму велосипеда, в якій розташовано АБ та контролер (рис. 2, б).

Під час експериментальних досліджень для визначення глибини розряджання акумуляторної батареї здійснено п'ять заїздів, кожний з яких припускав різні дорожні умови, інтенсивність руху, а також навантаження транспортного засобу. Маршрут відповідав міському режиму руху з врахуванням наявності світлофорів та інтенсивності руху на дорогах. Цикл руху включав в себе ділянки з інтенсивним розганянням та гальмуванням, максимальна швидкість становила 65 км/год. Протягом експериментів проведено три заїзди з навантаженням 100 кг і два – з навантаженням 120 кг.



а)



б)

Рис. 2. Загальний вигляд експериментального зразка

На рис. 3 і 4 приведені осцилограми змінювання струму, напруги та ступеню зарядженості акумуляторної батареї в піковому (рис. 3) та номінальному (рис. 4) режимах її експлуатації при напрузі АБ в 55 В.

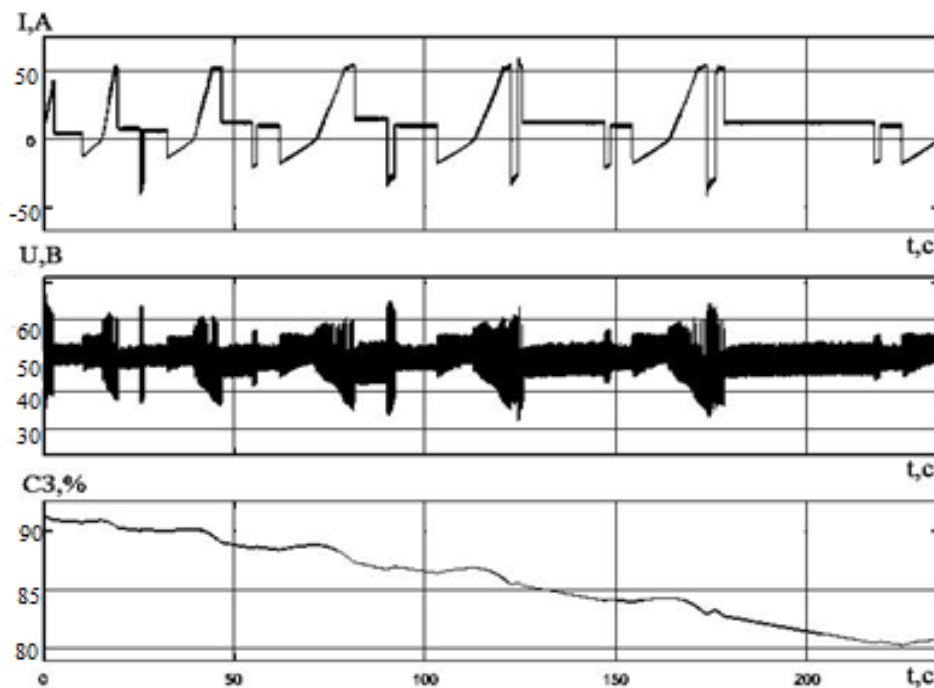


Рис. 3. Графіки змінювання струму, напруги та ступеню зарядженості АБ в піковому режимі

Максимальний струм, необхідний для забезпечення розганяння в піковому режимі, склав близько 50 А, а спадання напруги – близько 7 В. Ступінь зарядженості батареї протягом циклу знизилась на 15%. За номінальним режимом роботи (рис. 4) енергоефективність акумуляторної батареї підвищилась: струм навантаження становив 30 А, спадання напруги 3 В, ступінь зарядженості зменшилась лише на 2%.

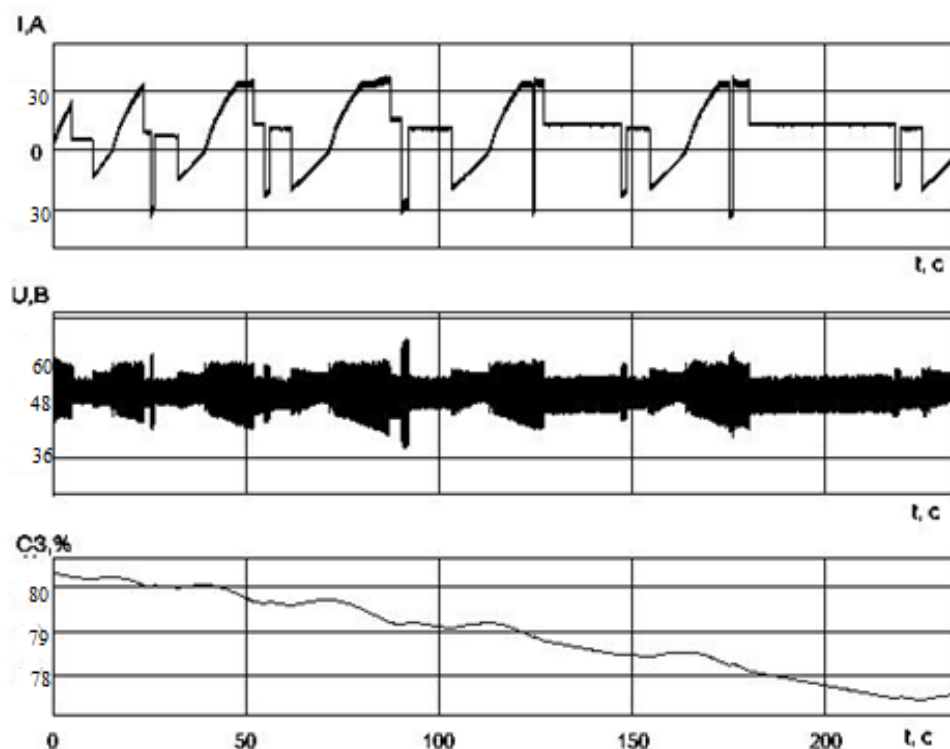


Рис. 4. Графіки змінювання струму, напруги та ступеню зарядженості АБ в номінальному режимі

Результати обробки експериментальних даних і розрахунків приведено в табл. 3.

Таблиця 3

Показники електроприводу велосипеда під час руху

Параметр	Значення	
	Піковий режим	Номінальний режим
Тривалість циклу, с	235	235
Максимальна потужність, що віддається АБ, Вт	35	20
Витрати енергії з урахуванням рекуперації, Вт·год/км	85	55
Енергія, що витрачена АБ, Вт·год	90	60
Відстань, що пройдена, м	1720	1720
Максимальний струм розрядження, А	50	30
Максимальний крутний момент двигуна, Н·м	100	90

Наступним етапом проведених досліджень було визначення впливу температури на ресурс акумуляторної батареї. Експлуатація АБ за низьких температур призводить до різкого зниження кількості циклів, тому рекомендованим діапазоном температур є 10...35°C. Результати експериментальних досліджень приведено на рис. 5.

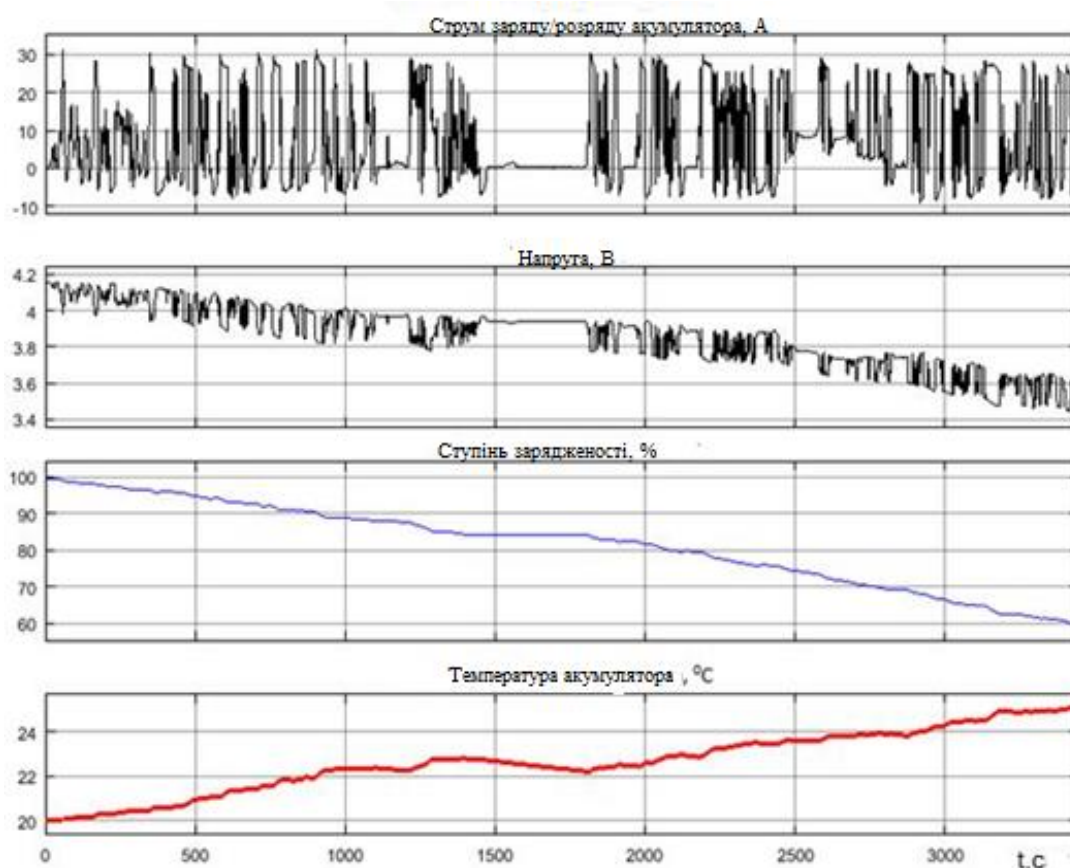


Рис. 5. Часові осцилограми основних характеристик АБ в циклах з а температурою навколишнього повітря 20°C

Під час експлуатації відбувається нагрівання стінок АБ. З метою визначення температури АБ після циклу роботи необхідно виконати деякі розрахунки. Профіль струму при п'ятому циклі руху зводиться до одного акумулятора шляхом ділення

загального струму на кількість комірок, що з'єднані паралельно. Максимальна температура нагрівання АБ становила 25°C після циклів руху 4 і 5. Максимальна різниця між початковою і кінцевою температурами Δt наприкінці циклу склала 5°C за температурою навколишнього повітря 20°C (рис. 6). Ступінь зарядженості акумулятор знизилась зі 100% до 60%, а напруга зменшилась до 3,6 В.

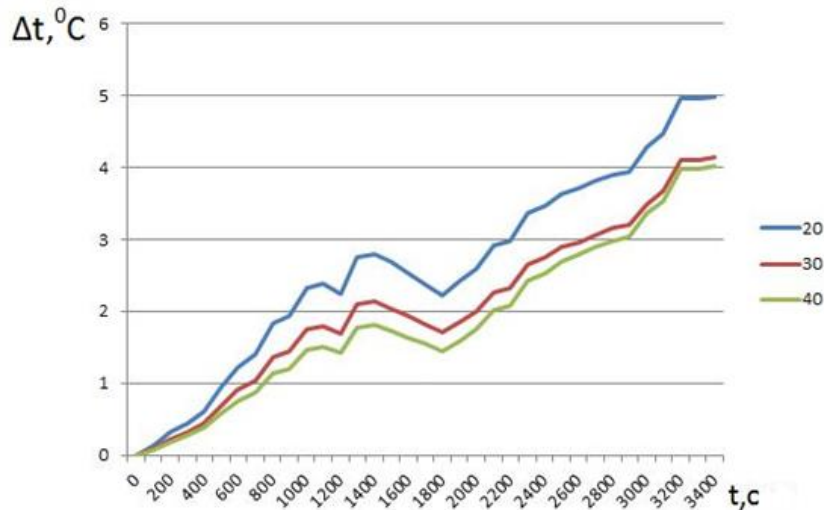


Рис. 6. Ступінь нагрівання АБ за різних значеннях температури навколишнього повітря

Під час визначення ресурсу АБ температурний діапазон більше 45°C не розраховується, тому що ресурс акумулятора значно зменшується. Відсутність системи примусового охолодження в експериментальному зразку дозволяє визначити ступінь нагрівання не тільки на зовнішніх стінках акумулятора, але і в середині осередку. Встановлено, що, коли цикл заряджання або розрядження йде безперервно, температура осередку не знижується до початкового стану, а навпаки, продовжує збільшуватись. Визначено, що при різких змінах швидкісного режиму транспортного засобу відбувається найбільше нагрівання стінок АБ та зниження заряду.

Висновки. Рекомендовано в якості тягового джерела струму для двоколісного особистого транспортного засобу використовувати літій-іонну акумуляторну батарею.

Проведені експериментальні дослідження на виготовленому зразку електричного велосипеда показали, що номінальний режим руху транспорту є найбільш раціональним з точки зору енергоефективності АБ. Встановлено, що акумуляторна батарея, яка застосовується в особистому транспортному засобі, під час роботи в номінальному режимі за умовою дотримання температурних режимів значно краще зберігає свій ресурс.

Встановлено, що зарядно-розрядний струм не повинен перевищувати номінальне значення для збереження ресурсу акумуляторної батареї. Запропоновано заряджати АБ за її неповному розрядженні, що дозволить не підвищувати зарядні струми протягом всієї експлуатації на маршруті руху.

Список використаної літератури

1. Сидоров К. М. Перспективні системи тягового електрообладнання для транспортних засобів / К. М. Сидоров, Т. В. Голубчик, В. Є. Ютт // Вісник МАДІ. – 2012. – № 1 (28).
2. Bolun Xu (2016). Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment. Article in IEEE Transactions on Smart Grid June.
3. Ning, G., White, R.E., Popov, B.N. (2006). A generalized cycle life model of rechargeable li-ion batteries. Electrochimica Acta, Vol. 51, No. 10, Pp. 2012–2022.

4. Розробка та дослідження електромеханічних систем автоматизації та складових електропривода: навч. посіб. / М. Г. Попович, В. В. Кострицький, Л. Ф. Артеменко, О. П. Бурмістенков, О. О. Головка; МОНМС України, НТУ України "Київ. політехн. ін-т", Київ. нац. ун-т технологій та дизайну. – К., 2011. – 492 с.
5. Waldmann, T., Kasper, M., Fleischhammer, M., Wohlfahrt-Mehrens, M. (2014). Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium – ion batteries – A Post – Mortem study. Journal of Power Sources, Elsevier, 363, pp. 129–135. DOI 10.1016/j.jpowsour.2014.03.112,hal-03787753.
6. Мікеров А. Г. Керовані вентильні двигуни малої потужності: навч. посібник / А. Г. Мікерова. – СПб.: Изд-во СПбГЕТУ "ЛЕТІ", 1997. – 64 с.
7. Arcus, C. (2016). Battery Lifetime: How Long Can Electric Vehicle Batteries Last. Retrieved from: <http://cleantechnica.com/2016/05/31/battery-lifetime-long-can-electric-vehicle-batteries-last/>
8. Канівський Л. С. Деградація літій-іонного акумулятора і методи боротьби з нею / Л. С. Канівський, В. С. Дубасова // Електрохімія. – 2005. – Том 41, № 1. – С. 319.